

# 弾性波トモグラフィによるコンクリート構造物の健全性評価技術

## Damage Evaluation of Concrete Structures by Seismic Tomography

塩谷 智基\*<sup>1</sup> Dimitrios G. Aggelis\*<sup>1</sup> 桃木 昌平\*<sup>1</sup>  
Tomoki Shiotani Shohei Momoki

### 【要旨】

コンクリート構造物の損傷や補修時期/方法を検討する場合、現状の損傷判断がその鍵といえ、様々な検査手法が適用されてきた。しかし、各検査手法の標準化とその判断基準の一般化には、更に多くの事例が必要とされる現状にある。アコースティック・エミッション、弾性波トモグラフィなど弾性波を利用した計測技術は、構造物検査手法としての有用性に加えて、これまで容易ではなかった修繕工事の効果、確認まで定量的に判断可能な検査手法と考えている。弾性波法の標準化には、もちろん豊富なデータベースが不可欠といえるが、本報告では弾性波トモグラフィのアプローチ方法を概観するとともに、補修前後に実施した原位置適用事例を示し、その有用性を論じる。また、弾性波トモグラフィ技術の高度化として開発した三次元弾性波トモグラフィと速度分散特性についての研究を報告する。

【キーワード】 コンクリート構造物 健全性評価 補修効果 弾性波トモグラフィ 速度分散特性

### 1. はじめに

近年、橋梁やダム、トンネルなど土木構造物の老朽化が顕在化し、社会問題になっている。‘持続可能なインフラ構造物であること’が国際的に唱えられる現代において、我々土木技術者の責務は、これらの構造物の現状を定量的に判断し、可能な限り供用することであり、これらは適切な診断手法とその結果に基づく合理的な補修方法を前提として検討されるべきである。ここで、構造物の現状を把握するには、供用下における全体的な挙動(例えばモーダル解析など)に頼る反面、部位あるいは部材ごとの健全性診断と、これらごとの補修方法が検討されて当然である。さらに、補修後の修繕効果の確認は多くの補修工で実施されていないのが現状といえ、前診断、対策工(補修工)、後診断という一連の工程が実は上述の命題を解決する重要なワークフローとなる。

そこで本報告では、弾性波法を中心にコンクリート構造物の健全性診断手法を示すとともに、これらを適用した実構造物の調査結果を例示し、上述のワークフローへの弾性波法の適用性を論じる。

### 2. 弾性波による構造物調査方法

弾性波を用いる調査方法はその性質から、弾性波を励

起させてその反射や透過を論じる“能動的な超音波手法(励起周波数は超音波領域に限らない)”と、外力や内力変動が期待できる場合、構造物の欠陥箇所から励起される弾性波を計測する“受動的な手法; AE(アコースティック・エミッション)法”とに大別できる。ここで、本研究では比較的大規模な土木構造物を対象に検討することから、弾性波のエネルギー低下(減衰)が小さな低い周波数、つまり波長の長い弾性波を励起させ、損傷を弾性波の速度構造として議論できる弾性波トモグラフィ法を用いる。以下、弾性波トモグラフィについて詳述する。

#### 2.1 弾性波トモグラフィ

弾性波トモグラフィ<sup>1)</sup>は、調査断面を多数の格子状のセルに分割し、セル内の伝播速度が一定であると仮定して、調査断面を透過させた多数の波線の伝播時間を用いてそれぞれのセルの伝播速度を求め、その分布より調査断面内の伝播速度の二次元分布を求める手法である。弾性波トモグラフィでは、弾性波を用いるためX線とは異なり、伝播経路がひび割れや空隙などによる反射、回折などの影響を受け未知として取扱われる。つまり、速度分布算出の逆解析過程で波動の伝播経路計算、すなわち波線追跡(レイトレーシング)を行う必要がある。解析

1. 技術研究所 先端計測プロジェクト

は、図-1に示す解析フローを基本とする。まず、初期条件として、観測走時の計測、調査領域のセル分割、発振源・受振点位置データを作成し、初期モデル(初期スローネス分布)を与える。以下、波線追跡について詳述する。

最初に発信点から全節点に向かい波を放射させる。次に、発信点からの理論走時を計算し、その走時値と波の射出方向をその節点に記憶させる。波の到達した節点から再び全節点に波を放射し、発信点からの理論走時を求める。到達した節点に既に他方から波が到達していれば、最小の走時がその節点の走時として採用される。以上の操作を繰り返し、発振点から各節点に記憶されている波線の方法を順次たどることで波線経路、理論走時が求められる。

次いで、理論走時と実際に計測した観測走時との走時残差を計算する。残差が許容範囲内でなければ、カルマンフィルタによるスローネス(速度の逆数)の補正を行う。カルマンフィルタ(Kalman filter)とは、逐次的推定法の一つであり、極端な速度構造推定(例えば、実際のコンクリート構造物からはあり得ない極端に高い速度や、反対に極端に低い速度)が避けられるようになっている。レイトレーシングとカルマンフィルタを繰り返し行い、走時残差が許容内に収まれば、その時のスローネス分布が最終速度分布となる。ここで、弾性波トモグラフィにより得られる物理量は、各セル(対象構造物の区分ごと)の弾性波速度であり、弾性係数、密度、ポアソン比から得られる物理量であること、つまり、弾性波速度は直接的に強度と結びつけることが困難な物理量であることに注意すべきである。参考までに表-1は、コンクリートの単位体積重量が $2400 \text{ kgf/m}^3$ の場合に限り、米国ASTMより提案されている弾性波速度とコンクリートの良否評価である<sup>2)</sup>。

### 3. コンクリート床版ひび割れ補修効果評価への適用

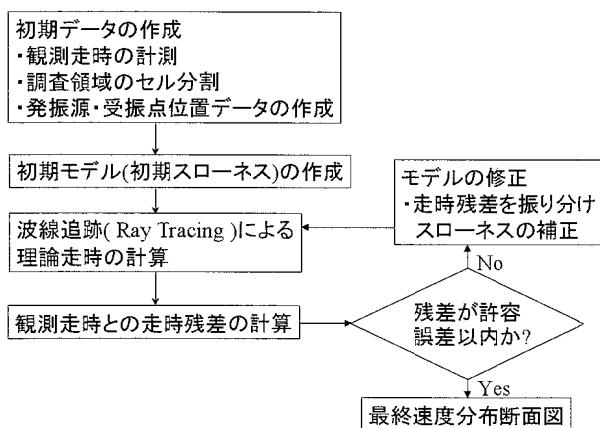


図-1 弾性波トモグラフィ解析フロー

表-1 弾性波速度とコンクリートの品質

縦波速度 $V_p(\text{ft/sec})$	縦波速度 $V_p(\text{m/s})$	評価
15000 以上	4570 以上	優
12000-15000	3660-4570	良
10000-12000	3050-3660	やや良
7000-10000	2130-3050	不良
7000 以下	2130 以下	不可

本事例は、コンクリート床版に発生したひび割れのエポキシ樹脂による補修工事において、補修効果を確認するために弾性波トモグラフィを用いたものである。以下詳細を示す。

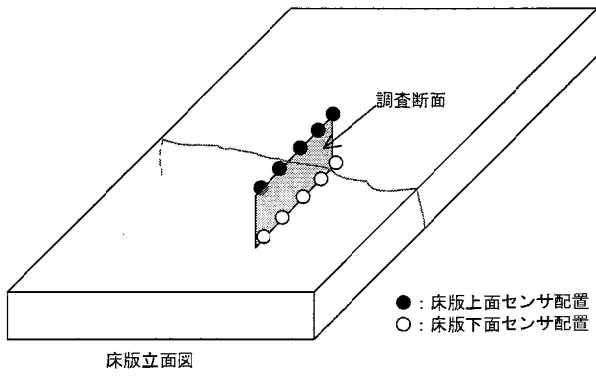
#### 3.1 調査機器および方法

弾性波トモグラフィ試験の概要を図-2、センサ配置図を図-3、実際のセンサ配置状況写真を写真-1に示す。図-2のようにひびわれを含む断面に各5個のAEセンサ(R6, PAC社製)を床版上面、下面に合計10個設置する。各センサからa) 擬似AE発信(高周波数対応, HI101, PAC社製), b) シャープペンシル芯圧折( $\sim 300 \text{ kHz}$  対応), c) 鋼製球(3 mm,  $\sim 9.7 \text{ kHz}$  対応) 打撃し、弾性波を励起させ、励起された弾性波をその他のセンサで計測する。ここで、検出信号の計測には16チャンネルAE計測装置(DiSP-4, 米国PAC社製)を用い、10 MHz サンプリング、10 k word 長(1024 x 10 サンプル)で収録する。これらを全センサまたは、全センサ近傍で実施し、得られた弾性波信号の励起センサを起点としたときの到達時間を用いトモグラフィ解析を実施し、計測断面の速度構造の変化から充填効果を検証する。

#### 3.2 調査結果

図-4に補修前後に得られた速度トモグラフィ結果を示す。補修前の上下面でのクラック観察から計測範囲で斜めクラック(上面12.5 cm, 下面5 cm)が予測され、それらは同図補修前結果より、右上から左下に向かう広い低速度域として確認できる。補修後結果より、補修前の低速度域は確認できず、4500 m/s 以上の速度域が全体で確認できる。コンクリート構造物の速度による良否判定手法は確立されていないものの、米国ASTMの指標(表-1参照)を参考にすると評価「優」に値することから、良好な補修効果が確認できたものと考えられる。

図-5に別のクラックの補修前後に得られた速度トモグラフィ結果を示す。補修前のクラック観察から上面、下面ともに約12.5 cm位置に観察されていたことから、鉛直クラックであると推察されていた。補修前結果より、



床版立面図

図-2 弾性波トモグラフィ概要

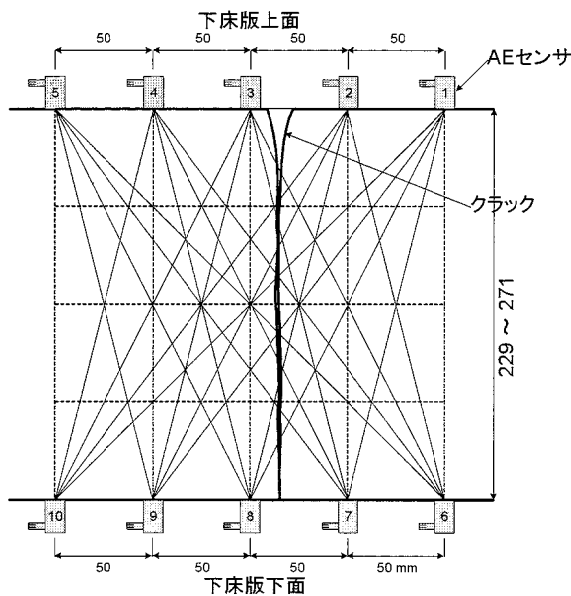


図-3 弾性波トモグラフィセンサ配置

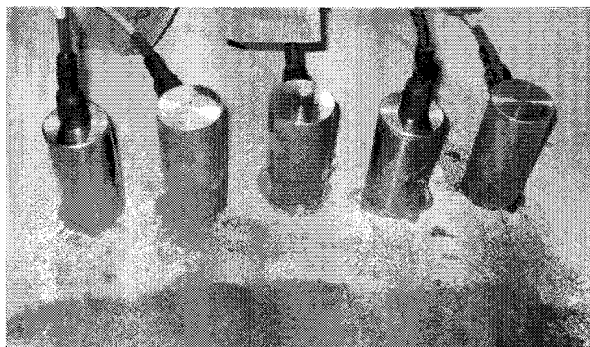
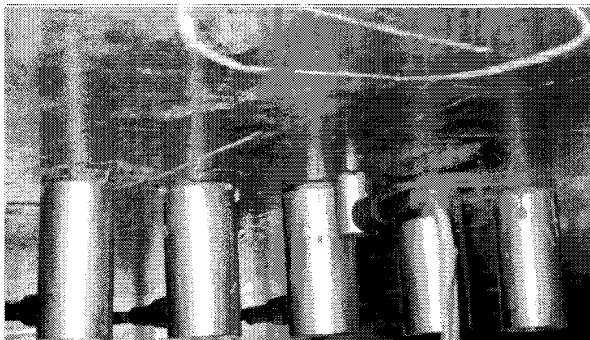


写真-1 弾性波トモグラフィセンサ設置

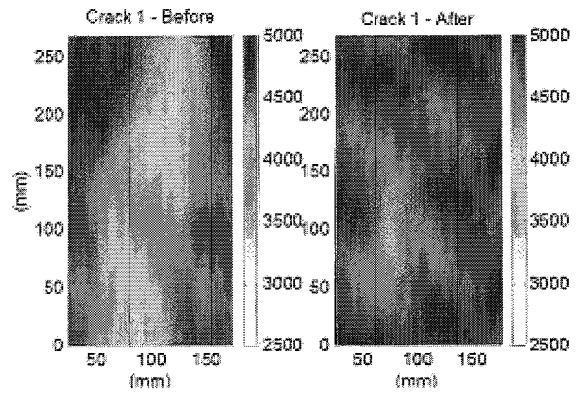


図-4 斜めクラック速度構造

(左:補修前, 右:補修後)

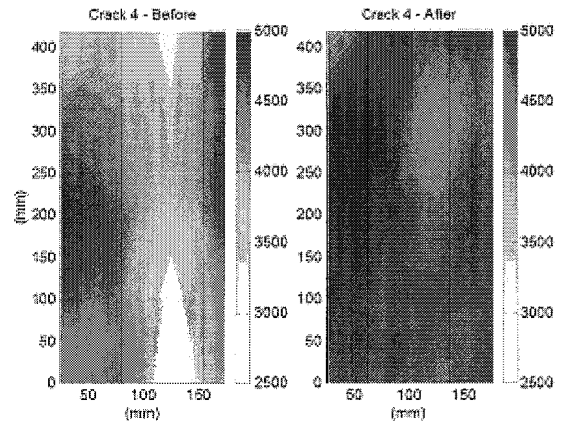


図-5 鉛直クラック速度構造

(左:補修前, 右:補修後)

上下観察クラック位置に鉛直に低速度層が得られ、これらの低速度層がクラック位置に相当するものと考えられた。補修後結果より、補修前にクラック位置に対応して鉛直に得られていた低速度層は確認できず、ほぼ全ての領域で4500 m/s以上の高い速度が得られた。よって、図-4と同様に、図-5でも明瞭な補修効果が速度増加として確認でき、ASTM 指標より評価「優」に値するまでの物性の改善が得られたものと思われる。

弾性波トモグラフィより、補修前のクラック範囲において低速度領域が得られ、補修後に顕著な向上および、健全部と同等の特性が得られたことから、補修材による充填効果は、断面全体として得られたものと思われる。

#### 4. ゲート式ダムピア補修効果評価への適用<sup>3)</sup>

北海道電力(株)藻岩発電所は建設以来約70年を経過し、取水堰ピアの設備延命化を図るための補修工事が実施されている。取水堰ピアコンクリート内部をグラウトにより補修する工法において、その補修による改良効果を定量的に評価するために非破壊調査(弾性波トモグラフィ、アコースティック・エミッション)を実施した。以下、弾性波トモグラフィ調査について述べる。

#### 4.1 調査概要

調査対象は藻岩発電所取水堰の右岸側P5, P6, P7橋脚であり、各橋脚ともに上流側および、下流側の2断面、計6断面で弾性波計測を行い、弾性波トモグラフィによる橋脚の速度構造変化より、グラウト材の空隙充填による補修効果を確認した。

#### 4.2 調査方法

図-6にP5橋脚の弾性波計測工の調査範囲、写真-2に構造物全景を示す。調査範囲は上部より3.96 mの位置から下方に7 mの範囲までを15個の加速度計を50 cm間隔で配置し、弾性波の送受信を各側面で行った。すなわち、受信側に上記のセンサ配置で受信センサを設置し、対面の送信側に発信トリガーセンサを1個設置し、打撃箇所を移動するとともに発信トリガーセンサも同時に移動して計測を実施した。このような方法で、上流側、下流側それぞれ2つの断面を調査した。ここで、加速度センサは30 kHz共振型を用い、打撃に用いた振動ハンマドリル先端の曲率を30Rとした。また、ドリル振動の間隔は30 Hz、約10秒間の連続打撃とし、得られる約300波形の重合波形から初動を読み取り、受信センサの到達時刻を求めた。

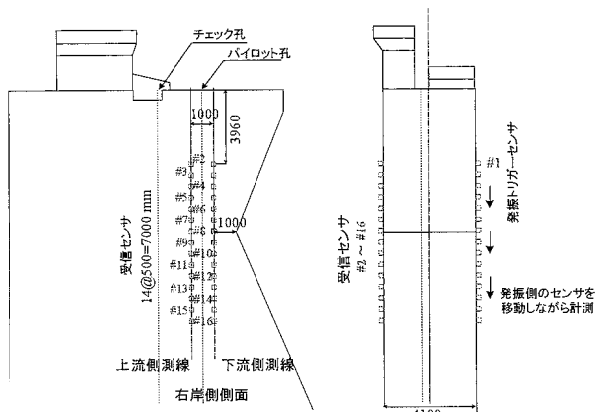


図-6 P5橋脚 弾性波計測工センサ配置図

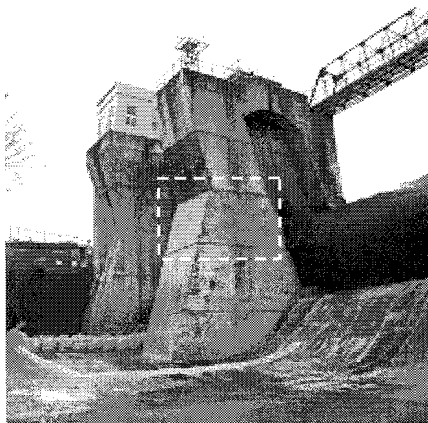


写真-2 調査対象構造物全景 (P5橋脚)

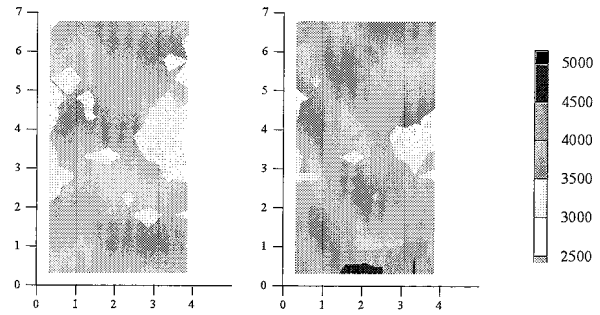


図-7 (a) P5橋脚上流側速度構造

(左：補修前、右：補修後)

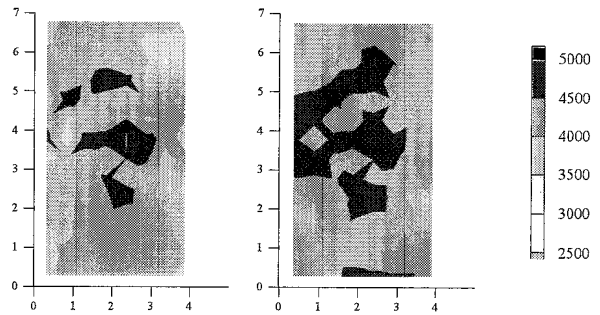


図-7 (b) P5橋脚下流側速度構造

(左：補修前、右：補修後)

#### 4.3 調査結果

トモグラフィ解析で推定されたP5橋脚上流面の速度構造を図-7(a)に、下流面を図-7(b)に示す。上流面の速度構造が下流面よりも低速度範囲の割合が大きいのは、貯水の浸潤・蒸発作用を繰返し受けてきたことによる劣化が主因と考えられる。上流面の補修前結果から、計測範囲全体の速度構造が一部を除き約3500 m/sを示し、全体的には許容可能な速度構造を有していたものと考えられる。詳細には、一部左岸側4 m高さ付近に3000 m/s以下の範囲も見られた。これに対し、上流面の最終速度推定<sup>4)</sup>を実施した補修後トモグラフィ結果より、下部に4000 m/sに達する速度向上が認められ、これらは上部にも確認できた。下流側の補修前結果から、計測範囲中央部の速度構造が約4000 m/sを示し、良好な速度構造を有していたことがわかった。詳細には、局所的に若干低い弾性波構造範囲が確認できた。これに対し、最終速度推定を実施した補修後弾性波計測結果より、低速度範囲の4000 m/s以上への改善や中央部での高速度範囲の拡大が確認できた。

#### 5. 技術の高度化

##### 5.1 三次元弾性波トモグラフィ

記述の通り、弾性波トモグラフィ(二次元)は実構造物の損傷診断や補修効果評価においてその有用性が極めて高いことがわかる。しかし、実構造物の損傷は三次元空間に分布するものであり、上述の手法を実構造物の包

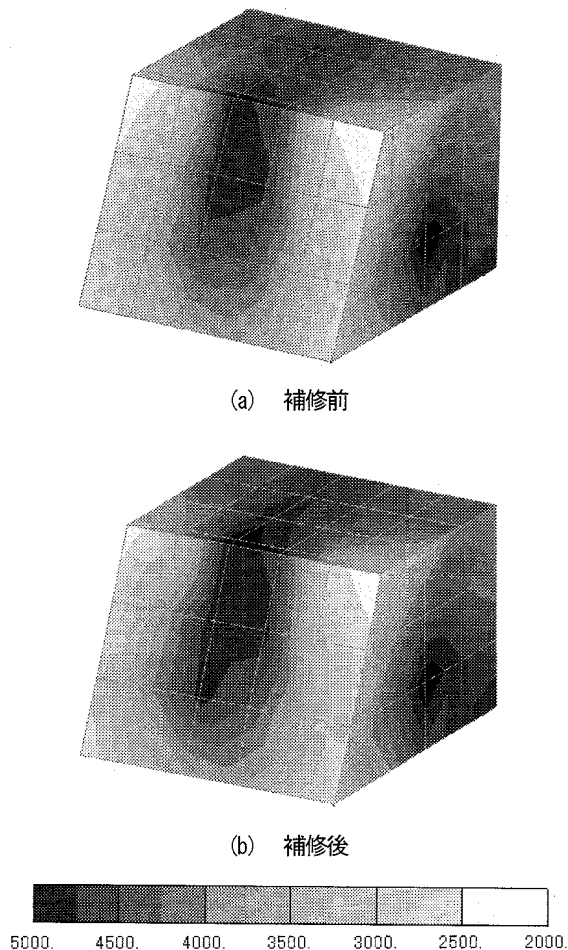


図-8 三次元弾性波トモグラフィ計測結果

括的な損傷評価に適用するためには、多数かつ多方向の計測断面が必要となり多大な労力と時間を要する。そこで、アインパラメトリック座標による弾性波の三次元波線追跡（レイトレース）アルゴリズムと SIRT（Simultaneous Iterative Reconstruction Technique）をベースに、センサを三次元に配列することであらゆる断面の速度構造を評価することができる三次元弾性波トモグラフィ技術を開発した<sup>9)</sup>。ここでは、三次元弾性波トモグラフィアルゴリズムの詳細は参考文献を参照されたい。三次元弾性波トモグラフィの実構造物への適用事例として前述の P5 橋脚の補修効果調査結果を図-8 に示す。計測部位は写真-2 の破線部であり、同図は紙面正面が下流側である。

補修前(a)の速度構造は、下流側中央部において高い速度範囲を示し、一部端部を除いて全体的に良好な速度構造を示している。これに対し、最終速度推定を実施した補修後結果(b)より、下流側中央部の高速度分布の拡大と、端部の低速度分布の縮小が読み取れる。このことからグラウト充填による改善効果が確認できる。また、図-9 に三次元弾性波トモグラフィより抽出した、P5 橋脚中央縦断面の弾性波トモグラフィを示す。補修前結果より二次

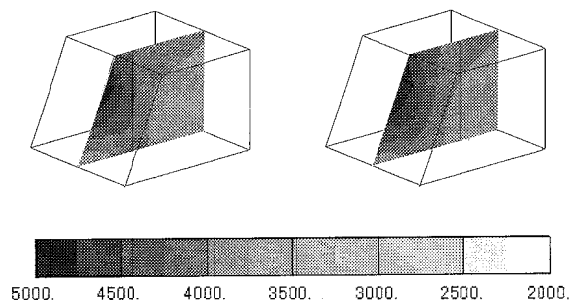


図-9 上下流断面トモグラフィ抽出結果  
(左：補修前，右：補修後)

元弾性波トモグラフィと同様に上流側と下流側の速度差が読み取れる。補修後結果と比較すると、高い速度分布の広がり、すなわちグラウト充填の改善効果を、従来の二次元トモグラフィ手法ではセンサ配置が困難な（調査できない）上下流断面からも確認することができた。このように、三次元弾性波トモグラフィ結果より、任意断面を抽出し分析することで、損傷規模や補修効果の効率的かつ包括的な把握が可能となった。

## 5.2 損傷規模における速度分散特性

これまで述べてきたように、弾性波トモグラフィ計測は、損傷を速度構造として定量化でき、補修補強効果をその速度の改善値として検討できる有用な技術である。ここで、適用前に特に注意すべき点は、励起周波数（波長）と対象損傷規模の検討であり、波動の伝播減衰を考慮した励起周波数、励起方向の決定が必要となる。そこで弾性波トモグラフィ計測のさらなる高度化を目的に、損傷規模における速度分散特性について示す<sup>6)</sup>。プレーンモルタル試験体（150×150×150 mm）と、図-10 に示す軽微損傷から重度損傷を反映させた、ビニル板（15×15×0.5 mm/枚）による擬似ひび割れ（体積比，a：1%，b：5%，c：10%）の試験体について、励起周波数を変化させ、弾性波速度の分散特性を検討した。実験概要を図-11 に、実験結果を図-12 に示す。すべての試験体で、周波数が高くなるほど、弾性波速度が増加する傾向が認められた。特に大きい損傷規模の10%モルタル(d)において速度分散特性は顕著であった。また、低周波数（10 kHz）での10%損傷モルタルの速度低下は最大20%、高周波数（500 kHz）では8%であった。つまり、速度は周波数に依存する値であり、損傷を受けるほどこの傾向が強くなることがわかる。したがって、弾性波速度構造により損傷診断を行う場合、損傷規模を考慮した適切な励起周波数を用いることが肝要であることが明らかである。今後、損傷規模における速度分散特性を含んだ、弾性波速度と健全性を関連付ける豊富なデータベースの構築が必要不可欠と考えている。

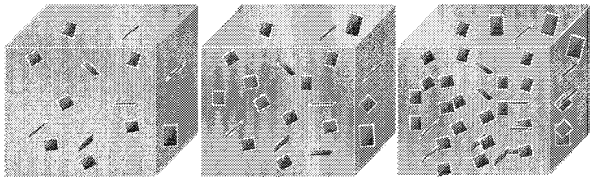


図-10 擬似ひび割れ試験体  
(左からa: 1%, b: 5%, c: 10%)

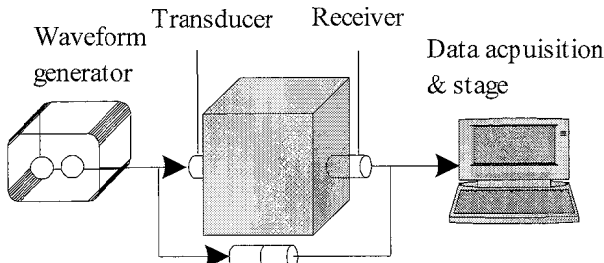


図-11 実験概要図

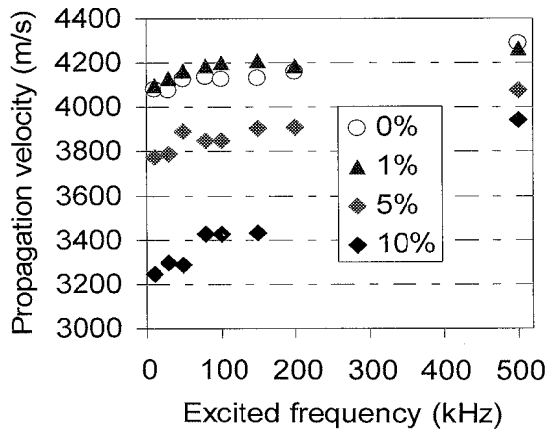


図-12 速度分散特性

## 6. おわりに

本報文では、弾性波トモグラフィが損傷を速度構造として検討でき、その値で補修効果が定量的に判断し得ること、さらに、三次元弾性波トモグラフィ技術によって、

コンクリート構造物の健全性評価をより包括的かつ効率的に行うことができることを示した。ここで、本技術の適用前に特に注意すべき点は、既述の励起周波数(波長)と対象損傷規模の検討であり、さらには波動の伝播減衰を考慮した励起周波数、励起方向の決定である。今後、損傷程度と弾性波速度との関係がさらに多数の事例で得られ、豊富なデータベースを構築することで、一般的に認識された物理計測技術としての確立を目指したい。

**謝辞:** 本手法は、日本大学 小林義和先生との共同研究により実施されたもので、その現場適用に際しては、北海道電力株式会社 札幌水力センターの関係各位に多大なるご協力をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

## 【参考文献】

- 1) 佐々宏一, 芦田 譲, 菅野 強: 物理探査, pp. 117-127, 森北出版, 1993.
- 2) 岡田 清, 六車 熙: 訂新版コンクリート工学ハンドブック, pp. 520-530, 朝倉書店, 1981.
- 3) 若松洋介, 松山俊明, 塩谷智基: 老朽化したコンクリート構造物における補修改良効果検証について, 電力土木 No. 330, pp. 27-30, 2007.
- 4) Aggelis, G. D. and Shiotani, T.: Damage evaluation on concrete materials using characteristics of elastic waves, Structural Faults and Repair, CD-ROM, 2006.
- 5) Kobayashi, Y., Shiotani, T., Aggelis, G. D. and Shojiri, H.: Three-dimensional seismic tomography for existing concrete structures, Proceedings of Second International Operational Analysis Conference, Vol. 2, pp. 595-600, 2007.
- 6) Aggelis, G. D. and Shiotani, T.: Effect of inhomogeneity parameters on wave propagation in cementitious material, ACI Material Journal, 2007, in press.

**Summary :** Aging concrete structures have been significantly increasing, and to sustain those, the evaluation of their structural integrity with a proper repair method is a crucial issue. Non-destructive testing (NDT) appears to contribute to this paramount issue, since it includes a variety of testing methods corresponding to the measurement scale. NDT also provides momentous information on repair effectiveness when the test is repeated after the repair work. In this study, seismic tomography, one of NDT methods, was applied for the damage quantification of full-scale concrete structures. The tests were conducted both before and after repair work. The distributions of velocity led to a conclusion that the velocity variations represented well the repair effect. Also, this paper presents three-dimensional seismic tomography and velocity dispersion, which are essential for future study.

**Keywords :** aging concrete structure, damage evaluation, repair effect, seismic tomography, velocity Dispersion